

海泥环境中阴极保护的边界元计算

王秀通^{1, 2}, 侯保荣¹, 李焰¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据阴极保护的特点, 建立了用于数值计算的模型; 采用边界元方法对海泥介质中的阴极保护系统进行了计算, 获得了海泥中钢管表面以及海泥介质内部的电位分布。将计算的结果与测量的数据进行比较, 两者具有较好的一致性。

关键词: 阴极保护; 边界元; 海泥

中图分类号: T G 174. 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2006)12-0062-03

在传统的阴极保护设计中, 牺牲阳极或外加电流系统的辅助阳极在保护系统中的位置主要是根据工程设计的经验来确定。采用这种技术往往在很大程度上依赖于项目腐蚀设计工程师的经验, 需要采用较大的安全系数, 并在系统的运行和维护中进行修正。在过去数十年中, 随着计算机的普及, 应用计算机对海洋构筑物采用数值技术设计阴极保护系统得到了迅速发展, 这种趋势也和世界范围内在更深海域的石油钻探和生产活动有关, 一些大型海洋结构物的尺寸和复杂性都达到了空前的程度, 只是根据传统经验方法来进行阴极保护的设计已经不能满足工程的需要了, 数值计算方法开始运用到腐蚀和防护领域, 边界元方法就是其中的一种。

1 边界元模型建立

边界元法在腐蚀和防腐问题中的首次应用是从 Fu 和 Chow^[1] 开始的。他们应用格林第三公式导出了关于边界上分布电位及分布电流密度的边界积分方程, 用常数单元来离散边界, 并把计算结果同实验数据进行了比较, 证明了这种数值计算方法的准确性。

作者针对阴极保护的特点, 对模型的建立提出了如下的假设:

(1) 电解质为均匀介质。在海洋环境中, 海泥的电导率受到不同环境的影响而有所变化, 同时不同的季节, 不同的水深, 电导率也会有轻微的变动, 但总体来说, 对于同一海域, 电导率的变化是比较小的。

(2) 电位场为稳态场, 且遵循欧姆定律。因为考

虑的主要是在长期极化后阴极表面的电位分布, 该分布状况随时间变化很小, 可以认为该电位场为稳态电位分布场。

对于常见的海洋中的构筑物来说, 在距离海洋构筑物足够远处, 电位可以看作是零, 即 $\phi = 0$, 这属于方程的第一类边界条件; 在构筑物的绝缘表面, 由于没有电流流出, 即 $q = 0$, 这属于第二类边界条件; 在阴极表面上, 电位状态和电流状态之间的关系满足极化曲线, 即 $i = f(\phi)$, 这属于第三类边界条件。对于本文所研究的包含均匀电解质的区域 Ω , 满足 Laplace 方程以及如上的边界条件, 因此可以建立阴极保护的边界元计算模型。

2 实验

在一个 $400\text{ mm} \times 480\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 的塑料槽内装满海泥, 埋入一根海底管线用钢管, 长度为 940 mm , 管表面全裸, 两端用橡皮塞塞紧, 阳极连接在管线的一端。钢管材质为 API 5L S2, 阳极材质为铝-锌合金, 长度为 60 mm 。阴极的极化曲线如图 1 所示。

收稿日期: 2006-01-16; 修回日期: 2006-10-26

基金项目: 中海油总公司与中国科学院合作项目“海底管线牺牲阳极保护电流检测及其与环境相关性研究”

作者简介: 王秀通(1977), 男, 山东青岛人, 博士, 研究方向: 海洋环境腐蚀与防护, 电话: 0532-82898731, E-mail: wangxiutong@ms.qdio.ac.cn

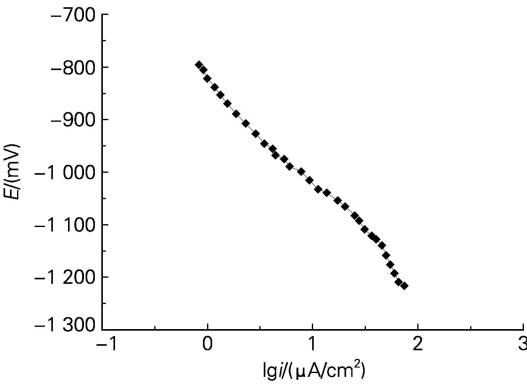


图 1 海泥中阴极和阳极的极化曲线

Fig. 1 Polarization of the anode and cathode in sea mud

Yan^[2]研究了在阴极保护条件下的管道的电位和电流密度分布,根据低碳钢在人造海水中的非线性极化曲线,通过拟合,作为管道上的边界条件,利用程序估计了在一块或两块阳极保护下的低碳钢管道的计算实例。证明了阳极的数量、尺寸和阳极、阳极之间的距离对于阴极保护具有重要的作用。针对非线性的边界条件, Iwata^[3]等提出了分段拟线性化方法。Santiago^[4]等运用动电位极化技术进行边界元数值模拟的研究,考虑了随着时间的变化对于极化曲线的影响,并提出了相应的解决方法。Chisholm^[5]探讨了对多反应电化学极化曲线进行求解的算法,指出了解决极化方程的难点: (1) 尽管极化方程是“电位和电流点对点”的,通过 Laplace 方程所需要建立的数值的工作量是相当大的,这也取决于所要计算的结构的尺寸; (2) 受系统各种参数的影响,极化方程的非线性有可能变得非常严重; (3) 在电极上发生的各个电化学反应不是孤立的^[6],而是相互联系的,这无疑增加了极化方程的复杂程度,从而使求解变得更加困难。

对上述的极化曲线进行拟合,考虑到本算例中的阴极和阳极在给定区间电位和电流密度的对数呈线性关系,阴极的极化曲线拟合公式可以表示成:

$$\phi = -200 \lg i - 820$$

$$\text{或者: } i = \exp(-0.0115\phi - 9.43)$$

i 为电流密度, ϕ 为电位。在确定了极化曲线的拟合公式后,为了对非线性边界进行处理,采用 Newton-Raphson 迭代法^[7]进一步确定边界元计算的边界条件,计算流程如图 2 所示。

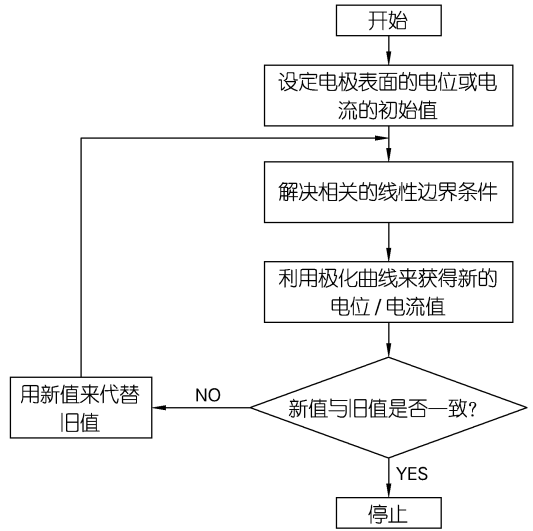


图 2 迭代法求解流程图

Fig. 2 Flow chart of iterative process solution

根据边界元计算的要求,采用常数单元进行边界划分,在钢管上划分 10 个单元,在阳极上划分 6 个单元,其余部分为 20 个单元,划分示意图如图 3 所示。以极化曲线作为边界条件,使用边界元阴极保护计算程序对阴极和阳极的电位分布进行了计算。

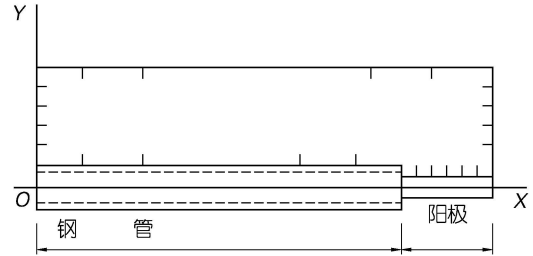


图 3 海泥介质的划分示意图

Fig. 3 Discretization of the corrosion cell with mud

3 结果与讨论

钢管及阳极表面电位分布的计算结果和实验测量结果如图 4 所示,从图中可以看出,计算结果与实验结果吻合得比较好,误差最大处不超过 7%,也说明了该程序计算在安装有牺牲阳极的海底管道的有效性。

在图 5 中,根据区域的等势图可以看出,在 $x = 300 \text{ mm}$ 靠近电极表面的地方和远离阳极的外表面的位置电位稍微偏正,作者认为这也是跟阴极保护电场中电力线的分布有关系的。从钢管及阳极表面以及整个区域的电位分布可以看出,利用仿真程序计算所得到的结果与管道阴极保护的趋势基本相同。

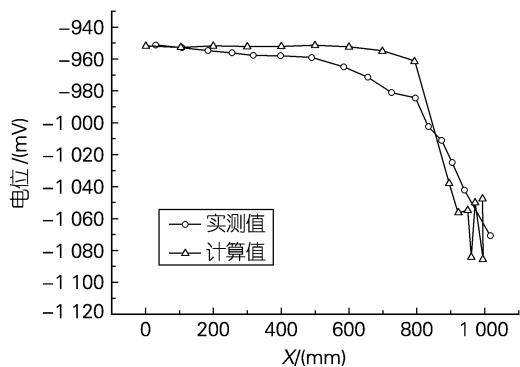


图4 钢管及阳极表面电位分布

Fig. 4 Potential distribution of the surface of the anode and pipeline

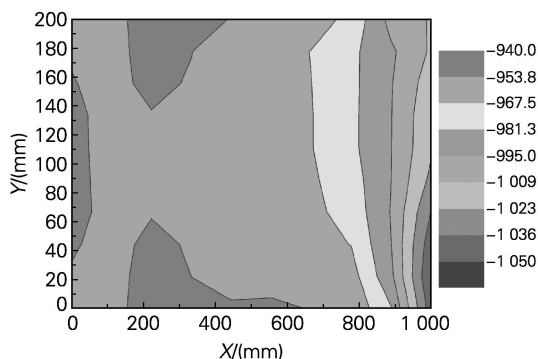


图5 整个区域的电位等势图

Fig. 5 Potential contour of the whole area

4 结论

边界元方法应用于海泥中的阴极保护系统数值计算中, 通过将计算数值与测量值的比较, 证明了该方法是非常有效的。

参考文献:

- [1] Fu J W, Chow J S. Cathodic protection designs using an integral equation numerical method [J]. **Mater Performance**, 1982, **21**(10): 8-12.
- [2] Yan J F, Pakalapati S N R, Nguyen T V, *et al.* Mathematical modeling of cathodic protection of a low carbon steel pipeline in seawater using the boundary element method [J]. **J Electrochem Soc**, 1992, **139** (7): 1932-1936.
- [3] Nagai K, Iwata M, Ogawa K. Numerical analysis of potential distribution in electrolyte under cathodic protection [J]. **J of the West Japan Society of Naval Architects**, 1987, 114.
- [4] Santiago J A F, Telles J C F. On Boundary elements for simulation of cathodic protection systems with dynamic polarization curves [J]. **Int J Numer Methods Eng**, 1997, **40**(14): 2611-2627.
- [5] Chisholm E, Gray L J, Giles G E, *et al.* Solution of nonlinear polarization boundary conditions [J]. **Electronic Journal of Boundary Elements**, 2003, **1**(3): 418-438.
- [6] Van Berkel G J, Giles G E, Bullock J S, *et al.* Computational simulation of redox reactions within a metal electrospray emitter [J]. **Anal Chem**, 1999, **71** (23): 5288-5296.
- [7] Brebbia, C A, Maier G. *Boundary Elements VII* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 23-26.

Boundary element method for the cathodic protection in sea mud

WANG Xiurong^{1, 2}, HOU Baorong¹, LI Yan¹

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Jan., 16, 2006

Key words: cathodic protection; boundary element method; sea mud

Abstract: According to the character of the cathodic protection, a model is constructed for numerical computation. The Boundary Element Method is used to calculate the cathodic protection system in the sea mud media, and the potential distributions of the pipeline surface and in the sea mud are obtained. The numerical results and the experimental results are compared at the same time, and they have good consistency.

(本文编辑: 张培新)